

Двойные радиочастотные синтезаторы с импульсно-фазовой автоподстройкой частоты серии ADF4000

Мы продолжаем серию статей о синтезаторах частот производства Analog Devices Inc., являющихся базовыми элементами любых систем связи, навигации, кабельного и спутникового телевидения. В серии будут рассмотрены синтезаторы частот с импульсно-фазовой автоподстройкой частоты (PLL).

Сергей Дмитриев

sergey@eltech.spb.ru

Юрий Никитин, к. т. н.

syntez@loniir.ru

Компания Analog Devices (ADI) предлагает широкий спектр микросхем двойных цифровых синтезаторов частот на основе систем квази-адаптивной импульсно-фазовой автоподстройки частоты (ИФАП) серии ADF 4000.

Серия включает в себя двойные синтезаторы как с целочисленным (integer-N), так и с дробным (fractional-N) коэффициентом деления. Синтезаторы серии изготавливаются по современной технологии BiCMOS 0,35 мкм, могут работать в интервале пита-

ющих напряжений 2,7–3,3 В (ADF4217L-4219L и ADF4252) или 2,7–5,5 В (все остальные) в диапазоне рабочих температур -40... +85 °С.

Семейство двояных RF/IF-синтезаторов ADF4000 позволяет реализовать современные гетеродины портативных приемопередатчиков с повышением (в трансмиттере) и понижением (в приемнике) частоты. В сочетании с внешними ГУН и петлевыми фильтрами приборы семейства ADF4000 образуют законченную систему гетеродинов PLL.

Минимизация занимаемой площади печатной платы способствует минимальная обвязка микросхем пассивными элементами и переход на новые корпуса. ADI предлагает микросхемы синтезаторов не только в традиционном корпусе TSSOP, но и в корпусах типа CSP (вариант CC-24). Кроме того, повышенная интеграция способствует уменьшению энергопотребления.

На рис. 1 приведен вариант структурной схемы приемника GSM с использованием в качестве гетеродинов однокристалльных двухпетлевых синтезаторов серии ADF4000. Приемник выполнен по схеме двойного преобразования частоты, поэтому двойной гетеродин на одном кристалле существенно облегчает его конструктивную реализацию.

На рис. 2 показан один из вариантов выполнения двойного гетеродина на микросхеме ADF4219L.

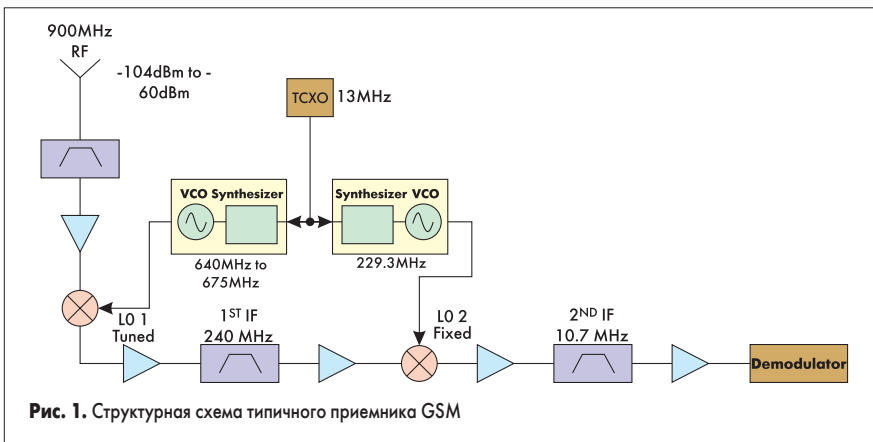


Рис. 1. Структурная схема типичного приемника GSM

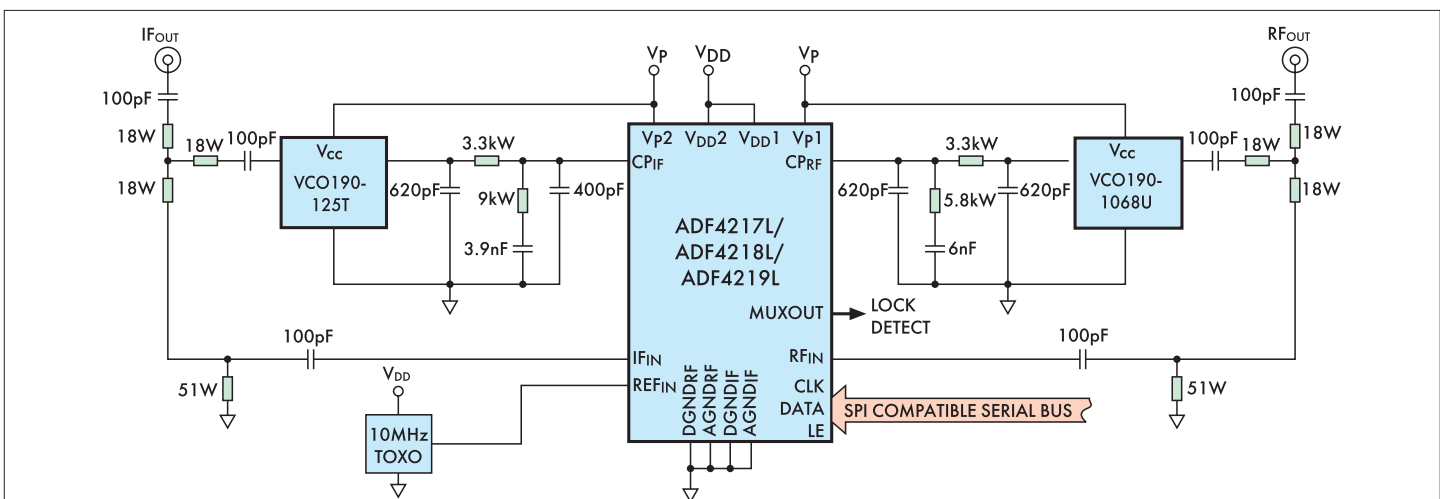


Рис. 2. Гетеродин для системы GSM на микросхеме ADF4219L

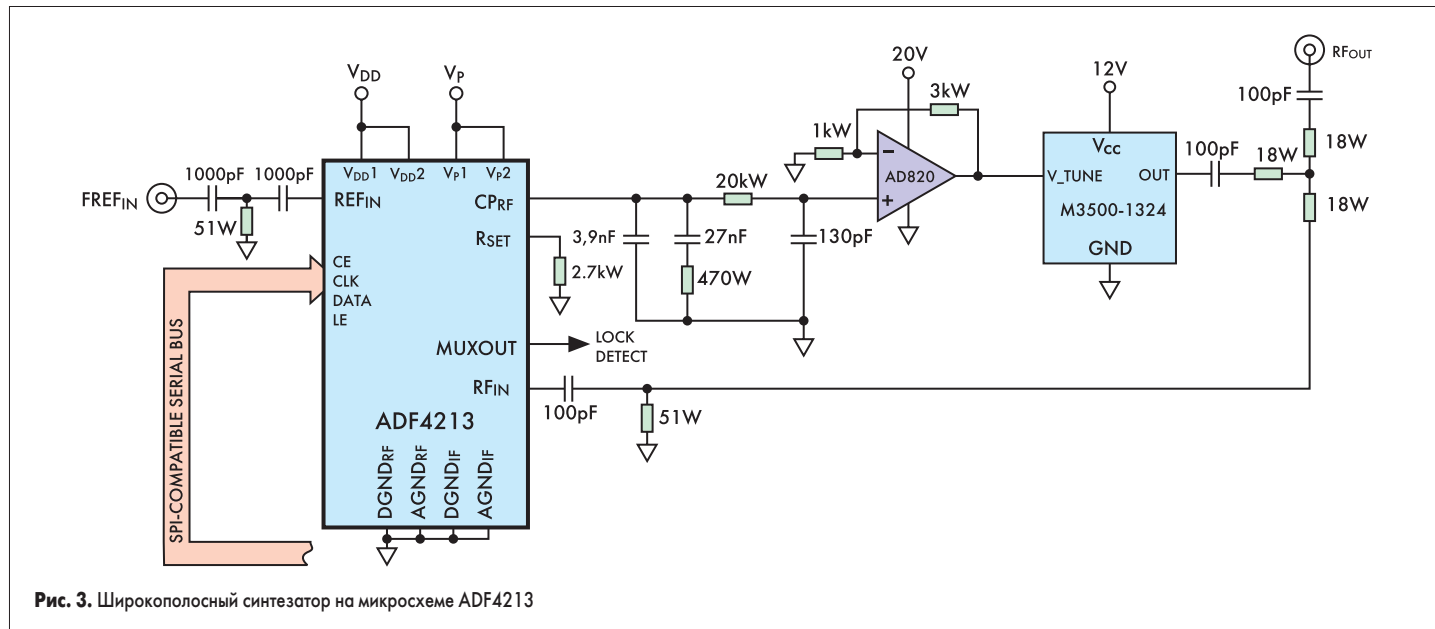


Рис. 3. Широкополосный синтезатор на микросхеме ADF4213

На рис. 3 приведена схема широкополосного гетеродина на RF-синтезаторе микросхемы ADF4213.

Диапазон синтезируемых частот составляет 1350–2340 МГц при шаге сетки 1 МГц. Полоса прозрачности петли ИФАП — 40 кГц, выходной ток частотно-фазового детектора (ЧФД) — 2,5 мА. Следует обратить внимание на построение петлевого фильтра: издромное звено отделено от входной цепи ГУН буферным усилителем с коэффициентом передачи $K = +4$.

Буферный усилитель выполняет две основные функции:

- Во-первых, он увеличивает размах управляющего напряжения практически до 20 В (реально до 18 В) для того, чтобы ГУН перекрыл требуемый диапазон.
- Во-вторых, он изолирует по постоянному току выход ЧФД и издромное звено от нагрузки, уменьшая тем самым возможные токи утечки.

Такая изоляция позволяет уменьшить уровень дискретных побочных спектральных составляющих (ПСС) в выходном сигнале. Действительно, при малых управляющих (запирающих) напряжениях токи утечки варикапов ГУН возрастают, как, впрочем, и при увеличении температуры.

Рост тока утечки приводит к росту уровня дискретных ПСС в низкочастотной части выходного диапазона. Использование развязки с помощью высококачественного усилителя AD820 позволяет избежать неконтролируемого изменения тока.

Описание и характеристики двойных синтезаторов серии ADF4000

Использование прескалера с различными значениями модуля P позволяет расширить возможности применения микросхем в устройствах различного частотного диапазона. Например, у ADF4219L в IF-канале $P_{\text{мин}} = 8$ и $N_{\text{мин}} = 56$, а в RF-канале $P_{\text{мин}} = 16$ и $N_{\text{мин}} = 240$.

В таблице 1 приведены значения модулей деления прескалеров, коэффициентов деления опорных делителей $R_{\text{макс}}$ ($R_{\text{мин}} = 1$)

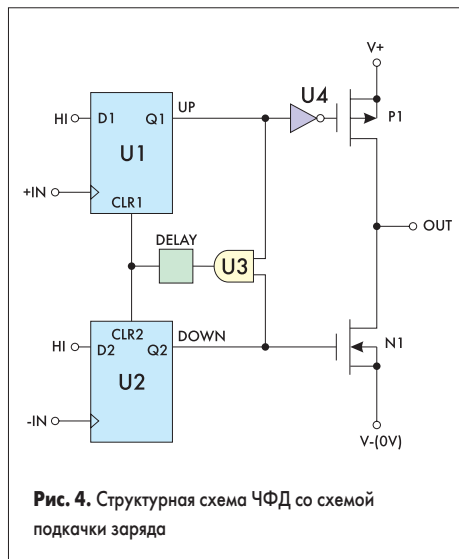


Рис. 4. Структурная схема ЧФД со схемой подкачки заряда

и выходных токов ЧФД в секциях RF и IF двойных синтезаторов серии ADF4000.

Частотно-фазовый детектор (ЧФД) в синтезаторах рассматриваемой серии такой же, как и в микросхемах одиночных синтезаторов. Цифровая часть ЧФД дополняется парой комплементарных полевых транзисторов N1 и P1 с малыми токами управления и утечки — схемой подкачки (точнее, поддержания) заряда Charge Pump (рис. 4).

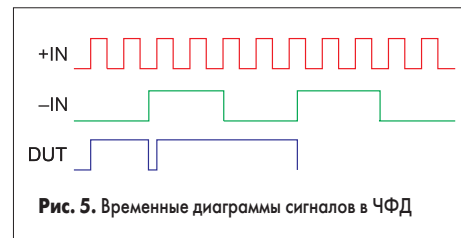


Рис. 5. Временные диаграммы сигналов в ЧФД

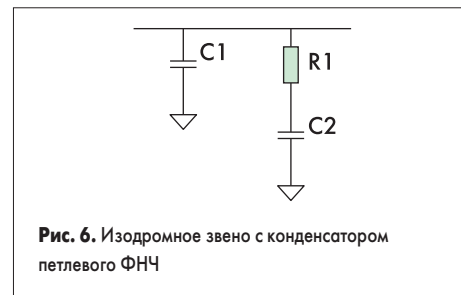


Рис. 6. Издромное звено с конденсатором петлевого ФНЧ

Временная диаграмма сигналов на входах и выходе детектора приведена на рис. 5. Она справедлива при использовании вполне определенных цепей внешней обвязки ЧФД — издромного звена R1C2 и, иногда, дополнительного ФНЧ, состоящего из конденсатора C1 и внутреннего сопротивления R0 открытых транзисторов ЧФД (рис. 6).

Издромное звено позволяет скорректировать амплитудно-частотную и фазочастотную

Таблица 1. Значения модулей деления и токов ЧФД в двойных синтезаторах серии ADF4000

Наименование узла	ADF4206	ADF4207	ADF4208	ADF4210	ADF4211	ADF4212	ADF4213	ADF4216	ADF4217	ADF4218	ADF42117L	ADF42118L	ADF42119L
P в секции RF	64/65, 32/33			8/9, 16/17, 32/33, 64/65				32/33, 64/65			32/33, 64/65	64/65, 32/33	16/17, 32/33
P в секции IF	64/65, 32/33			8/9, 16/17, 32/33, 64/65				8/9, 16/17				8/9, 16/17	
$R_{\text{макс}}$		16383			32767			16383			16383		32767
$I_{\text{ЧФД мин}}$ в секции RF, мА		1,25			0,301			1,25				1,0	
$I_{\text{ЧФД макс}}$ в секции RF, мА		4,375			9,0			4,375				4,0	
$I_{\text{ЧФД мин}}$ в секции IF, мА		1,25			0,294			1,25				1,0	
$I_{\text{ЧФД макс}}$ в секции IF, мА		4,375			8,704			4,375				4,0	
Число ступеней тока $I_{\text{ЧФД}}$		2			8			2				2	

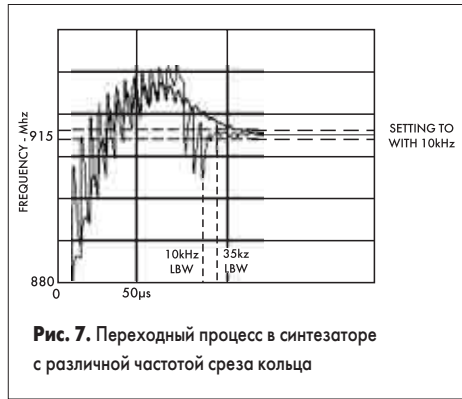


Рис. 7. Переходный процесс в синтезаторе с различной частотой среза кольца

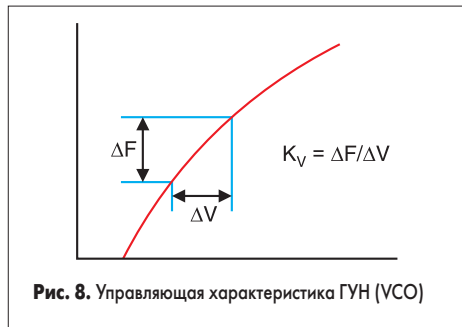


Рис. 8. Управляющая характеристика ГУН (VCO)

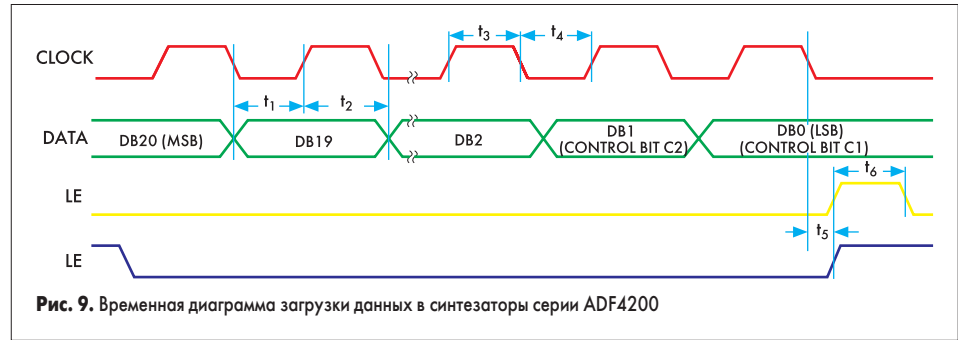


Рис. 9. Временная диаграмма загрузки данных в синтезаторы серии ADF4200

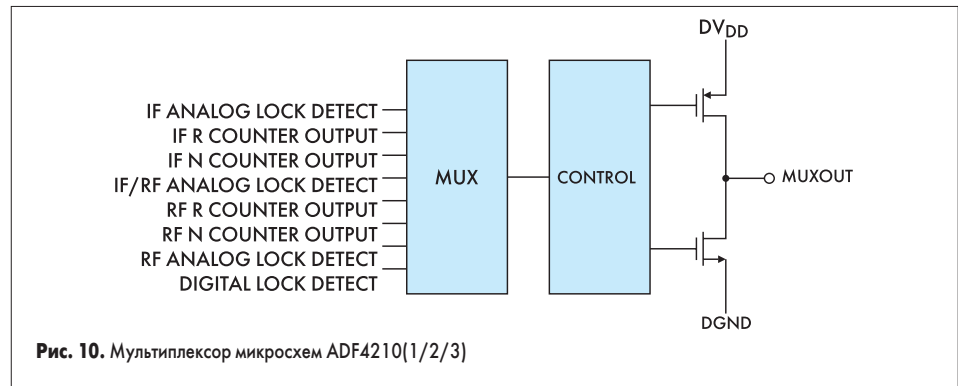


Рис. 10. Мультиплексор микросхем ADF4210(1/2/3)

Таблица 2. Частотные характеристики двойных синтезаторов серии ADF4000

Наименование вывода	ADF4206	ADF4207	ADF4208	ADF4210	ADF4211	ADF4212	ADF4213	ADF4216	ADF4217	ADF4218	ADF42117L	ADF42118L	ADF42119L
RF Input, МГц	550	1100	2000	1200	2000	2300	2500	1200	2000	2500	3000	2500	2200
IF Input, МГц	550	1100	1100	550	550	1000	1000	550	550	550	1100	1100	1000
REFIN, МГц	40	40	40	115	115	115	115	40	40	40	110	110	110
PROUT, МГц	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	188	188	188
PDIN, МГц	55	55	55	55	55	55	55	40	40	40	56	56	56

характеристики ИФАП в окрестностях частоты среза кольца и обеспечивает его устойчивую работу в диапазоне выходных частот.

Сочетание цифрового тракта ЧФД (D-триггеров с цепью сброса) и пары комплементарных транзисторов позволяет в режиме синхронизма обеспечить почти нулевое временное

рассогласование Δt между активными перепадами импульсов опорного колебания и приведенного колебания ГУН; абсолютная величина такого рассогласования составляет не более единиц наносекунд. Для этого необходимо, чтобы токи утечки изотропного звена (емкости C2 и C1) были незначительными на интер-

вале одного (и каждого) периода частоты сравнения. Тогда время перезаряда емкости изотропного звена будет минимальным и равным внутренней задержке цепей сброса цифровой части ЧФД, то есть определяться используемой технологией изготовления кристалла.

В рассматриваемых микросхемах возможно изменение полярности (наклона) характеристики детектора с прямой на обратную. Кроме того, выход ЧФД можно отключать (переводить в третье, высокоомное, состояние).

Чем шире полоса кольца (выше частота единичного усиления), тем лучше его динамика, то есть меньше время переходного процесса. На рис. 7 показан характер переходного процесса в квазиэлектронном кольце ИФАП с ЧФД при переключении с частоты 880 на 915 МГц.

Ясно видно, что кольцо ИФАП с полосой (частотой среза кольца) 35 кГц переключается быстрее кольца с полосой 10 кГц; с неточностью установления номинального значения новой частоты 10 кГц время переходного процесса составляет, соответственно, 142 мкс и 248 мкс. При уменьшении неточности установления до 1 кГц время перестройки увеличивается почти на порядок.

Крутизна управляющей характеристики ГУН $K_V = \Delta F_{ГУН} / \Delta U_{ЧФД}$ (рис. 7) может значительно изменяться по диапазону и существенно влиять как на устойчивость кольца в статическом режиме (в режиме синхронизма), так и на динамику кольца.

Например, при переключении выходной частоты ГУН с 915 на 880 МГц и характере изменения крутизны, показанной на рис. 8, амплитуда выброса по частоте и время переключения увеличатся, то есть возрастет колебательный характер переходного процесса.

Для компенсации изменения крутизны управляющей характеристики ГУН можно воспользоваться, например, изменением выходного тока ЧФД в диапазоне рабочих частот. Такая возможность (8 градаций) предусмотрена в синтезаторах ADF4210(1/2/3).

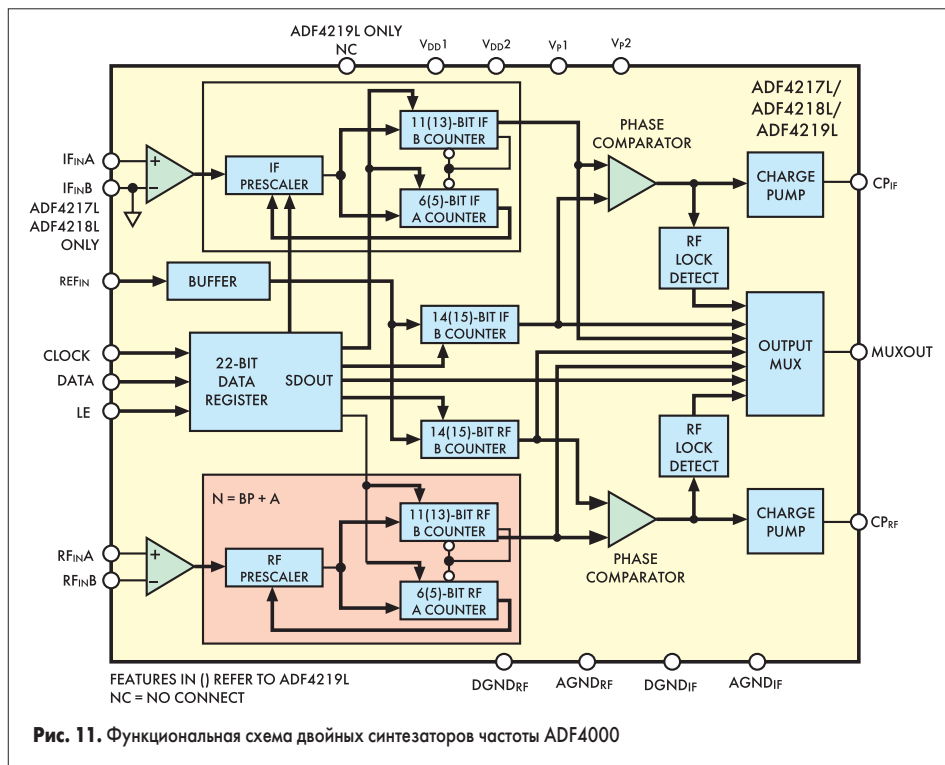


Рис. 11. Функциональная схема двойных синтезаторов частоты ADF4000

Таблица 3. Описание функций и обозначение выводов синтезаторов ADF4210(1/2/3)

Обозначение	Выполняемая функция
F _{Lo}	Выход «быстрого захвата». Можно использовать для переключения внешнего резистора, чтобы изменить полосу пропускания петлевого фильтра. Это ускоряет процесс захвата кольца ИФАП.
C _P _{RF}	Выход схемы поддержания заряда RF-секции ЧФД. При включении обеспечивает выходной ток ±I _{CP} для внешнего петлевого фильтра, который управляет внешним RF-ГУН.
C _P _{IF}	Выход схемы поддержания заряда IF-секции ЧФД. При включении обеспечивает выходной ток ±I _{CP} для внешнего петлевого фильтра, который управляет внешним IF-ГУН.
AGND _{RF}	Аналоговая «земля» RF-секции ЧФД
AGND _{IF}	Аналоговая «земля» IF-секции ЧФД
RF _{IN}	Вход ВЧ RF-прескалера. Этот вход для малых сигналов подключается к выходу RF-ГУН
IF _{IN}	Вход ВЧ IF-прескалера. Этот вход для малых сигналов подключается к выходу IF-ГУН
V _{DD1}	Питание аналоговых цепей RF-секции. Можно подавать +2,7–5,5 В. Развязывающие конденсаторы к шине аналоговой «земли» RF необходимо размещать как можно ближе к этому выводу. Потенциалы V _{DD1} и V _{DD2} должны быть одинаковыми.
V _{DD2}	Питание аналоговых цепей IF-секции, цифровых и интерфейсных трактов. Можно подавать +2,7–5,5 В. Развязывающие конденсаторы к шине аналоговой «земли» IF необходимо размещать как можно ближе к этому выводу. Потенциалы V _{DD2} и V _{DD1} должны быть одинаковыми.
REF _{IN}	Вход опорной частоты. Это КМОП-вход с порогом V _{DD} /2 и эквивалентным сопротивлением 100 кОм. Входной сигнал может быть уровня ТТЛ, КМОП или синусоидальным, подаваемым через разделительный конденсатор.
DGND _{RF}	«Земля» цифровых цепей RF синтезатора
DGND _{IF}	«Земля» цифровых цепей IF синтезатора, цифровых цепей управления и интерфейса
CLK	Вход тактовой частоты. Тактовая частота используется для тактирования последовательного ввода данных в регистры. Данные запоминаются в 24-разрядном регистре сдвига по фронту тактового импульса.
DATA	Последовательный вход данных. Данные загружаются СЗР вперед, с двумя МЗР в качестве контрольных разрядов. Это высокоомный КМОП-вход.
LE	КМОП-вход разрешения загрузки. Высокий уровень загружает данные, хранящиеся в регистрах сдвига, в один из четырех регистров-зачепок, который выбирается с помощью разрядов управления (контрольных битов) С0, С1.
MUXOUT	Выход мультиплексора позволяет вывести наружу либо сигнал контроля синхронизма, либо приведенную частоту опорного колебания, либо приведенную частоту RF-ГУН, либо приведенную частоту IF-ГУН (см. рис. 9).
DV _{DD}	Питание цифровой части. Можно подавать +2,7–5,5 В. Развязывающие конденсаторы к шине цифровой «земли» необходимо размещать как можно ближе к этому выводу. Величина DV _{DD} должна быть равна величине AV _{DD} .
V _{P1}	Питание схемы поддержания заряда RF ЧФД. Должно быть больше или равно V _{DD1} . В системах с V _{DD} = 3 В V _{P1} может быть равно 6 В и использоваться для управления ГУН с диапазоном управления до 6 В.
V _{P2}	Питание схемы поддержания заряда IF ЧФД. Должно быть больше или равно V _{DD1} . В системах с V _{DD} = 3 В V _{P2} может быть равно 6 В и использоваться для управления ГУН с диапазоном управления до 6 В.

Таблица 4. Описание способа установки тока ЧФД в двойных синтезаторах ADF4000

Тип	Обозначение	Выполняемая функция
ADF4206(7/8)	Цифровая установка	Установка тока ЧФД производится битом P5 в регистре «RF2 reference counter latch»: P5 = 0, I _{CP} = 1,25 мА; P5 = 1, I _{CP} = 4,375 мА
ADF4210(1/2/3)	Аналоговая R _{SET} и цифровая установка	Подключение резистора между этим выводом и CP _{GND} устанавливает максимальный выходной ток схемы поддержания заряда ЧФД. Номинальное напряжение на выводе R _{SET} равно 0,66 В. Взаимосвязь между I _{CP} и R _{SET} приведена ниже: $I_{CPmax} = \frac{13.5}{R_{SET}}$, например, при R _{SET} = 2,7 кОм, I _{CPmax} = 5 мА. Установка тока IF ЧФД производится битами DB23-DB21 в регистре «IF R counter latch»; установка тока RF ЧФД производится битами DB23-DB21 в регистре «RF R counter latch».
ADF4216(7/8)	Цифровая установка	Установка тока IF ЧФД производится битом P5 в регистре «IF reference counter latch»: P5 = 0, I _{CP} = 1,25 мА; P5 = 1, I _{CP} = 4,375 мА. Установка тока RF ЧФД производится битом P13 в регистре «RF reference counter latch»: P13 = 0, I _{CP} = 1,25 мА; P13 = 1, I _{CP} = 4,375 мА.
ADF4217L(8L/9L)	Цифровая установка	Установка тока IF ЧФД производится битом P5 в регистре «IF reference counter latch»: P5 = 0, I _{CP} = 1,0 мА; P5 = 1, I _{CP} = 4,0 мА. Установка тока ЧФД производится битом P13 в регистре «RF reference counter latch»: P13 = 0, I _{CP} = 1,0 мА; P13 = 1, I _{CP} = 4,0 мА.

Итак, во-первых, у всех синтезаторов серии ADF4000 минимальный коэффициент деления частоты опорного колебания R_{МИН} = 1. Во-вторых, алгоритм, структура и временные параметры загрузки данных по последовательному интерфейсу во всех синтезаторах серии одинаковы. Пользователь может выбрать один из двух вариантов загрузки:

- по фронту — третья строка рис. 9;
 - потенциальный — четвертая строка рис. 9.
- Двойные синтезаторы ADF4210(1/2/3) (рис. 11) по своим параметрам являются аналогами синтезаторов «одиночной» серии ADF4110(1/2/3) и удобны при построении приемопередатчиков различного назначения и частотного диапазона.

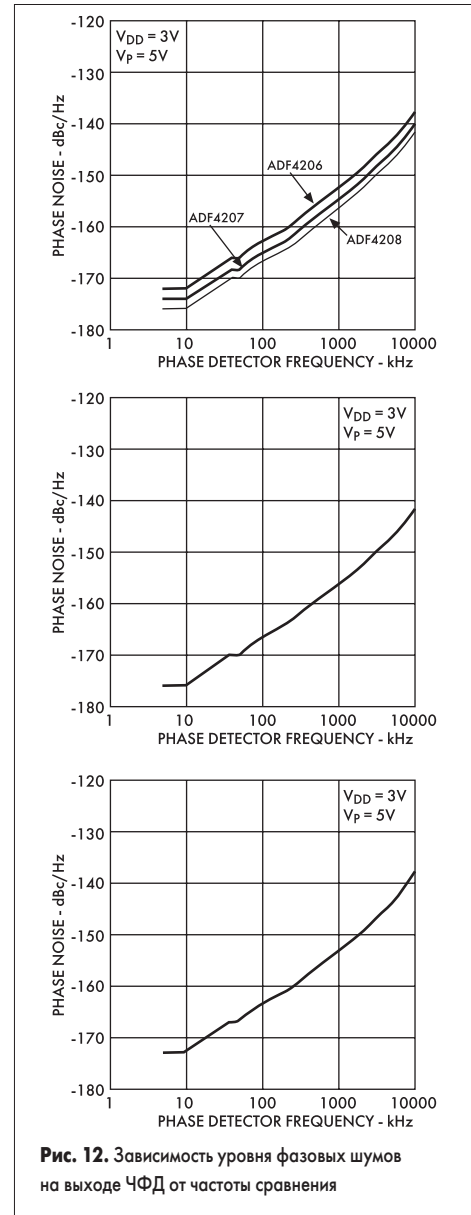


Рис. 12. Зависимость уровня фазовых шумов на выходе ЧФД от частоты сравнения

Кристаллы двойных синтезаторов серии ADF4206(7/8) — «pin-совместимые» аналоги серии чипов LMX2335(6/7); синтезаторы ADF4216(7/8) аналогичны приборам серии LMX2330(1/2); синтезаторы ADF4217L(8L) аналогичны кристаллам серии LMX2330L(1L), а синтезатор ADF4217L — синтезатору LMX2370 фирмы National Semiconductor.

Частотные характеристики двойных синтезаторов серии ADF4000 по радиочастотному входу RF input, по второму входу IF input, по опорному входу REF_{IN}, по выходу прескалера PROUT и по входу фазового детектора PDIN приведены в таблице 2.

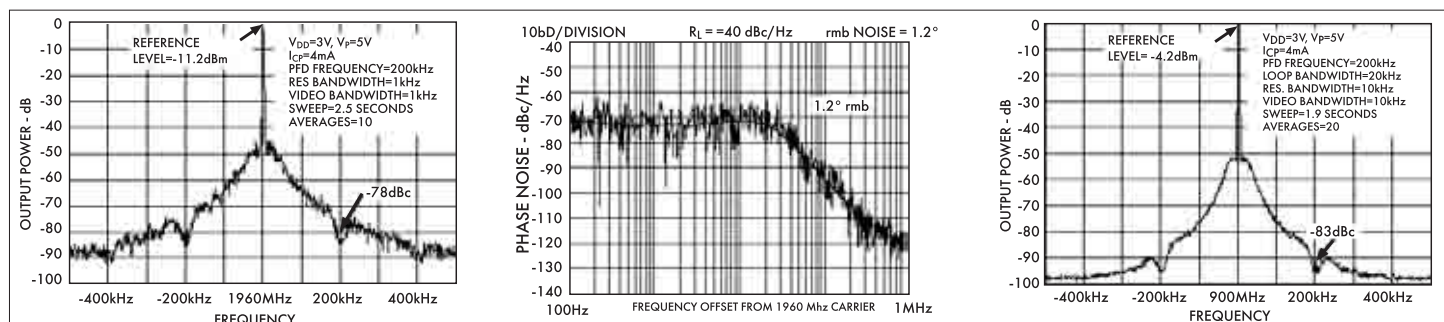


Рис. 13. Спектральные характеристики выходных колебаний синтезаторов ADF4217L(8L/9L)

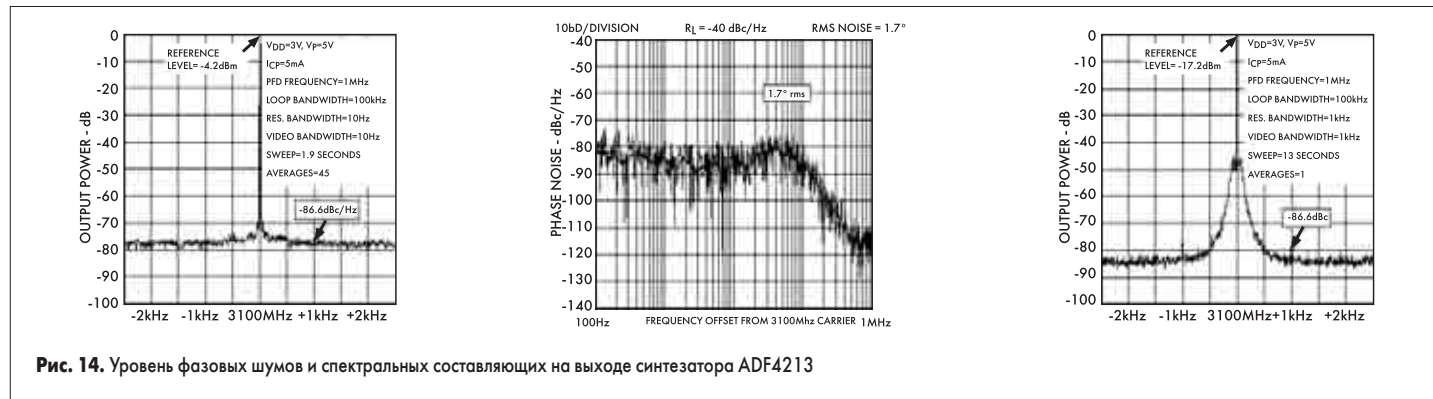


Рис. 14. Уровень фазовых шумов и спектральных составляющих на выходе синтезатора ADF4213

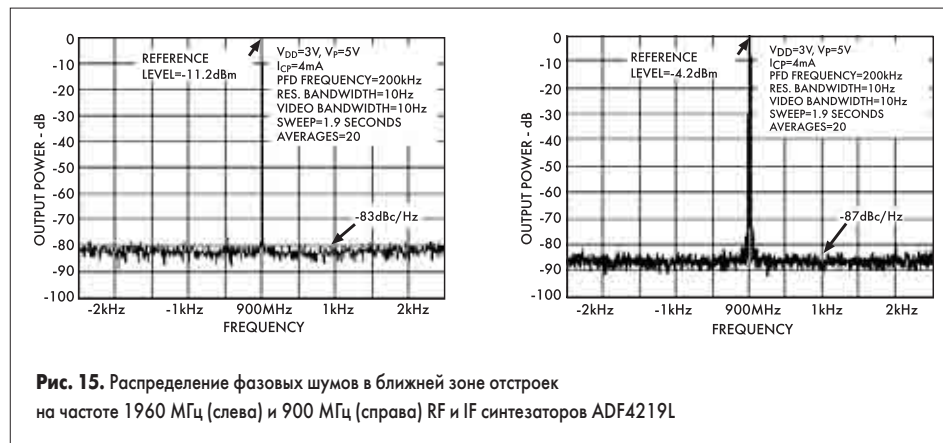


Рис. 15. Распределение фазовых шумов в ближней зоне отстройк на частоте 1960 МГц (слева) и 900 МГц (справа) RF и IF синтезаторов ADF4219L

На рис. 10 приведена структура выходного мультиплексора с указанием сигналов, значения которых могут быть скоммутированы на контрольный выход.

Спектральные характеристики синтезаторов приведены на рис. 12–15 и в комментарии их не нуждаются.

Проектирование двойных синтезаторов удобно вести с помощью интерактивной программы ADIsimPLL расчета кольца ИФАП, собранного с использованием чипов серии ADF4200 (www.analog.com/pll).

Как следует из приведенного обзора, двойные Integer-N синтезаторы по многим своим пара-

метрам дублируют друг друга. Поэтому компания ADI объявила о сокращении номенклатуры двойных синтезаторов в 2003–2004 годах. Так, до одного синтезатора ADF4212 сокращается серия ADF4210(1/2/3); целиком «уходит» серия ADF4206(7/8).

Вместо нее компания ADI рекомендует синтезатор ADF4252, который в планах ADI является наиболее перспективным. Также повсеместно рекомендуются к применению синтезаторы с пониженным энергопотреблением ADF4217L(8L/9L).

В следующей статье будут рассмотрены характеристики и вопросы применения двойного радиочастотного синтезатора частот с дробным коэффициентом деления ADF4252.

Литература

1. M. Curtin, P. O. Bien. PLL for HF receivers and Transmitters. Parts 1, 2, 3. Analog Dialog. 1999. Volume 33.
2. www.analog.com.